

Фотоэлектрические модули с цилиндрическими световодами в системе вторичного концентрирования солнечного излучения

© В.М. Андреев,¹ Н.Ю. Давидюк,² Е.А. Ионова,¹ В.Д. Румянцев¹

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия

² Санкт-Петербургский академический университет — научно-образовательный центр нанотехнологий РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: ionova@mail.ioffe.ru

(Поступило в Редакцию 5 февраля 2013 г.)

Представлены результаты исследований характеристик концентраторных фотоэлектрических модулей с трехкаскадными InGaP/GaAs/Ge солнечными элементами, фокусирующая система которых содержит вторичный оптический элемент новой конструкции. Этот элемент состоит из двух частей: плосковыпуклой линзы, находящейся в оптическом контакте с фронтальной поверхностью промежуточной стеклянной панели, и цилиндрического световода, соединенного с тыльной стороной стекла и расположенного над поверхностью солнечного элемента. Показано, что конструкция вторичного оптического элемента обеспечивает широкую разориентационную характеристику концентраторного модуля, а установка цилиндрического световода выравнивает распределение плотности излучения на поверхности солнечного элемента. Оценено влияние хроматической аберрации в первичной и вторичной оптических системах на параметры фотоэлектрических модулей. Установлено, что включение световодов длиной 3–5 мм приводит к эффективному перераспределению излучения по поверхности солнечного элемента, в то время как более короткие и более длинные световоды дают повышение локальной концентрации излучения в центре фотоприемной области.

Введение

Солнечные элементы (СЭ) каскадного типа на основе наногетероструктур материалов A^{III}B^V [1] при их совместном использовании с недорогими концентраторами излучения [2] являются перспективной элементной базой для систем возобновляемой энергетики. Экономическая оправданность разработки концентраторных фотоэлектрических модулей определяется такими факторами, как высокий КПД каскадных СЭ, составляющий на сегодняшний день 39–41% [3,4], и повышенная выработка электроэнергии в течение светового дня за счет необходимого в данном случае слежения за солнцем [5]. Для эффективного преобразования солнечной энергии оптическая ось пары „концентратор–СЭ“ должна быть постоянно ориентирована на видимое положение солнечного диска. В качестве первичных концентраторов наибольшее распространение получили линзы Френеля, в частности, изготовленные методом полимеризации прозрачного силикона на стеклянном основании [6]. При используемых на практике значениях кратности концентрирования 500–1000[×] и более геометрическая точность взаимного расположения элементов в паре и угловая точность слежения оказываются высокими. Для смягчения требований к точности позиционирования СЭ в модулях и точности слежения модулей в составе энергоустановок обычно предлагается вводить в оптическую схему концентрирования вторичные оптические элементы, например, конические отражатели или небольшие плосковыпуклые линзы. Конические отражатели изготавливаются либо из полированного листового алюминия, либо из массива стекла с полированными боковыми

поверхностями, отражающими солнечное излучение за счет эффекта полного внутреннего отражения [7–9]. Недостатком обоих типов отражателей являются ограничения в увеличении кратности концентрирования света и необходимость монтирования таких отражателей с минимальным зазором относительно поверхности СЭ, либо используя оптический контакт с этой поверхностью.

Применение плосковыпуклых линз малых размеров в качестве вторичных оптических элементов позволяет увеличить кратность концентрирования света и уменьшить угловую точность слежения концентраторных модулей, имея значительный зазор по отношению к поверхности СЭ [10,11]. В работе [12] приведены результаты исследований характеристик концентраторных модулей с использованием плосковыпуклых линз в качестве вторичных концентраторов. Использование плосковыпуклых линз позволяет уширить разориентационную кривую концентраторного модуля примерно в 2 раза — от 0.5° на уровне 0.9 от максимального значения генерируемого фототока до 1°. Это достигается за счет уменьшения диаметра светового пятна на поверхности СЭ. Однако центральная часть фоточувствительной поверхности СЭ освещается концентрированным излучением повышенной интенсивности, что может вызвать снижение эффективности солнечного элемента за счет локального разогрева и роста внутренних омических потерь.

В настоящей работе приведены исследования характеристик концентраторной системы фотоэлектрического модуля с новой конструкцией вторичного оптического элемента. Этот элемент состоит из двух частей — плосковыпуклой вторичной линзы и цилиндрического све-

товода (ЦС). Световод служит для перераспределения плотности светового потока по поверхности солнечного элемента, выполняя роль гомогенизатора, что приводит к уменьшению локальной концентрации, но при этом разориентационная характеристика модуля сохраняется такой же, как и в модулях с использованием в качестве вторичных концентраторов одних только плосковыпуклых линз. Вторичные оптические элементы новой конструкции были установлены в экспериментальном модуле с первичными концентраторами малой апертуры, представляющими собой линзы Френеля с преломляющим профилем из силикона. Линзовая и световодная части вторичного элемента находились в оптическом контакте с промежуточной стеклянной пластиной, играющей роль базы для электрогенерирующей панели фотоэлектрического модуля. Преобразование солнечной энергии в модуле осуществлялось трехпереходными СЭ InGaP/GaAs/Ge элементами. Основные характеристики исследуемых модулей, такие как световые вольт-амперные характеристики (ВАХ), разориентационные кривые, локальная кратность концентрирования на поверхности солнечного элемента, были измерены в лабораторных условиях с помощью специально разработанного импульсного имитатора солнечного излучения с коллимированным световым потоком.

Оптическая схема и конструкция концентраторного модуля

Основной целью исследований было определение влияния размеров цилиндрического световода во вторичном концентраторе на характеристики концентраторного модуля для нахождения оптимальных параметров конструкции.

На рис. 1 показаны оптические схемы сравниваемых модулей. Во всех модулях первичным концентратором

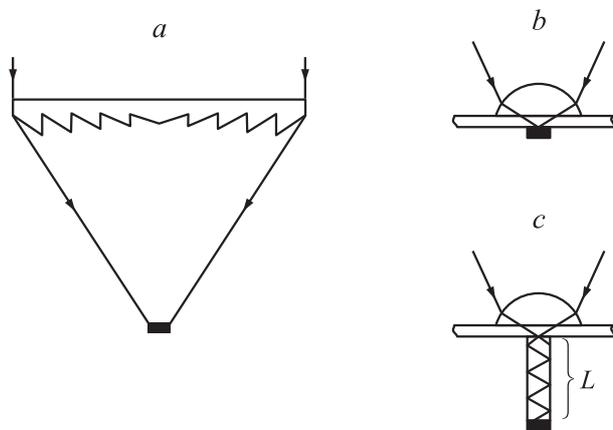


Рис. 1. Оптические схемы исследованных концентраторных фотоэлектрических модулей: *a* — концентраторная система без вторичной оптики, *b* — система с вторичным концентратором в виде плосковыпуклой линзы, *c* — система с вторичным концентратором в виде плосковыпуклой линзы и цилиндрического световода длиной *L*.

излучения была композитная линза Френеля, причем в первом из них вторичного концентратора не было, во втором модуле в качестве вторичного концентратора была использована плосковыпуклая линза малых размеров, а в третьем — плосковыпуклая линза и цилиндрический световод варьируемой длины.

Квадратные в плане силиконовые линзы Френеля размерами 40×40 mm с фокусным расстоянием 70 mm изготавливались на стеклянном основании толщиной 4 mm. Вторичные линзы с гладкой поверхностью имели диаметр 12 mm и фокусное расстояние 10 mm. Они были выполнены из стекла и приклеены на фронтальную (по ходу лучей) поверхность стеклянной панели толщиной 4 mm, используемую в качестве базы для вторичных оптических элементов. Цилиндрический световод был установлен соосно с вторичной линзой в промежутке между стеклянной панелью и солнечным элементом. Для уменьшения оптических потерь цилиндрический световод верхним торцом приклеивался к тыльной части стеклянной панели. В проведенных экспериментах длина цилиндрических световодов варьировалась от 2 до 12 mm. Солнечные элементы располагались позади стеклянной панели, при этом они были смонтированы на медных теплоотводящих основаниях. В исследуемой конструкции использовались солнечные элементы с диаметром светочувствительной области 2.3 mm, таким же был и диаметр световодов, изготовленных из стекла. В ходе экспериментов сравнивались результаты измерений для трех вариантов концентрирующих систем: без вторичной оптики, с вторичной линзой, с комбинируемым вторичным элементом, содержащим вторичную линзу и цилиндрический световод.

Методика измерений

Лабораторные исследования концентрирующих систем проводились при использовании имитатора солнечного излучения, включающего в себя импульсный источник света (ксеноновую лампу, излучающую „постоянно“ в интервале времени длительностью в 1 ms), оптический коллиматор и измерительный блок, к которому присоединялся СЭ [13]. Параметры установки обеспечивали полную имитацию солнечного излучения, за исключением тепловых эффектов: расхождение светового потока $32'$, спектр солнца AM 1.5, интенсивность светового излучения 1000 W/mm^2 , достаточно равномерное распределение плотности мощности излучения в пределах апертуры источника, играющего роль „солнечного диска“.

Концентрирующая система и СЭ были установлены на механические держатели, обеспечивающие точное взаиморасположение элементов системы и их прецизионное перемещение при управлении компьютером. Вся система как единое целое могла отклоняться от положения нормали с помощью вращательного механизма, при этом записывалась разориентационная кривая величины генерируемого фототока. Прецизионное перемещение фотоприемника в плоскости, перпендикулярной

оси светового потока, позволяло записывать локальное распределение кратности концентрирования излучения по площади СЭ.

Измерительная схема имитатора солнечного излучения за время одиночного импульса ксеноновой лампы-вспышки обеспечивала запись нагрузочной ВАХ солнечного элемента, при этом фиксировались такие основные параметры ВАХ, как ток короткого замыкания (I_{sc}), напряжение холостого хода (U_{oc}), мощность в точке оптимальной нагрузки (P_{max}), фактор заполнения ВАХ (FF) и КПД фотоэлектрического преобразования. По значениям I_{sc} одного и того же СЭ сравнивались оптические потери разных концентрирующих систем. Уменьшение FF давало информацию о наличии пространственной и спектральной неоднородностей внутри светового пятна, попадающего на фотоприемную площадку СЭ.

Разориентационные характеристики концентрирующей системы определялись при записи кривой зависимости I_{sc} от угла отклонения ее оптической оси системы от оптической оси коллиматора. Допустимый диапазон углов разориентации оценивался по полуширине этой кривой на уровне 0.9 от значения тока при нормальном падении лучей на первичную линзу ($\pm\Omega_{0,9}$). Для фотометрирования светового пятна использовался фотоприемник, диафрагмированный отверстием с диаметром 0.1 mm. По значениям I_{sc} , измеренным при движении фотоприемника вдоль одного из диаметров светового пятна или выходного торца цилиндрического световода, определялось распределение плотности излучения, которое формировалось в данной концентрирующей системе. Специальная калибровка позволяла определять абсолютные значения локальной кратности концентрирования „солнечного“ излучения в плоскости измерений.

Влияние параметров вторичных концентраторов на характеристики модуля

В ходе экспериментов были исследованы характеристики концентрирующих систем с комбинированными вторичными концентраторами, содержащими цилиндрические световоды длиной 2, 3, 5, 8 и 12 mm. Полученные характеристики сравнивались с характеристиками системы без вторичных концентраторов и системы с вторичными концентраторами в виде только одной короткофокусной линзы. Излучение регистрировалось трехкаскадными солнечными элементами на основе гетероструктур InGaP/GaAs/Ge.

Известно, что эффективность солнечного элемента может возрастать при лучшей фокусировке излучения на его фотоприемной поверхности за счет возрастания фототока. Однако эффективность может понижаться при слишком высокой локальной концентрации света, что приводит к уменьшению фактора заполнения ВАХ из-за омических потерь при сборании тока на удаленную

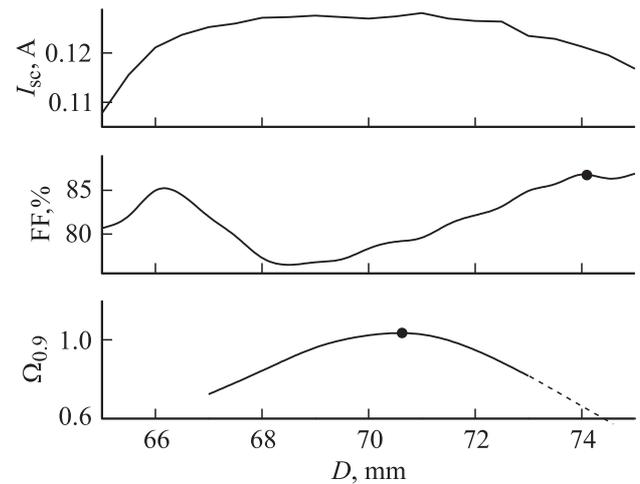


Рис. 2. Характеристики концентрирующей системы с ЦС длиной 2 mm.

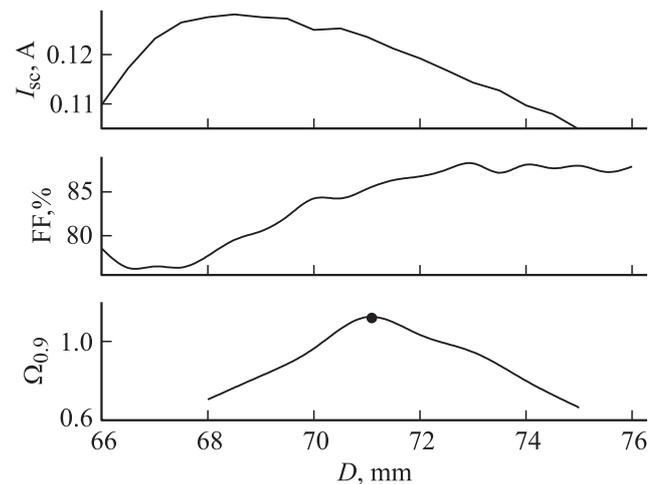


Рис. 3. Характеристики концентрирующей системы с ЦС длиной 3 mm.

токосборную шину и, возможно, локального разогрева. Фактор заполнения ВАХ в трехпереходном СЭ может понижаться также из-за хроматических aberrаций концентрирующей системы, когда в фокальном пятне максимумы интенсивности для разных длин волн не совпадают в пространстве, что, в свою очередь, вызывает возникновение латеральных токов между каскадами СЭ.

На первом этапе исследований находилось оптимальное расстояние для положения первичной линзы при различной конфигурации вторичных оптических элементов. Критерием оптимизации было максимальное значение ширины разориентационной кривой на уровне 0.9 от максимума фототока в комбинации с большим значением самого этого тока.

На рис. 2 и 3 представлены измеренные значения I_{sc} , FF и $\Omega_{0,9}$ для систем с цилиндрическими световодами длиной 2 и 3 mm в зависимости от расстояния D между

первичной и вторичной линзами. В случае системы с ЦС длиной 2 мм (рис. 2) при значении D , соответствующем максимальному значению ширины разориентационной кривой, фактор заполнения ВАХ пониженный, а в случае, если расстояние D таково, что фактор заполнения ВАХ достаточно высок, значение угла разориентации $\Omega_{0,9}$ значительно меньше 1° . Для концентрирующей системы с ЦС длиной 3 мм (рис. 3) существует оптимальное расстояние между первичной и вторичной линзами, при котором и фактор заполнения ВАХ, и параметр $\Omega_{0,9}$ имеют достаточно высокие значения. В данном случае оптимальное расстояние между первичной и вторичной линзами для обеих систем было выбрано $D_0 = 71$ мм. Для концентрирующих систем с ЦС длиной 5, 8 и 12 мм оптимальное расстояние D_0 устанавливалось вполне определенно, поскольку фактор заполнения ВАХ был высоким и практически постоянным при варьировании D в диапазоне 6–8 мм. Это означало, что, независимо от размеров светового пятна и возрастающей при расфокусировке спектральной неоднородности пятна на входном основании ЦС, на выходном основании световое пятно оставалось однородным по спектру.

На рис. 4 представлены значения I_{sc} , FF и $\Omega_{0,9}$ для концентраторных модулей с комбинированной системой вторичной оптики в сравнении с этими же значениями в системе без вторичного концентрирования или в системе с вторичным концентратором в виде только одной плосковыпуклой линзы при оптимальном расстоянии D_0 . Видно, что в системах с вторичными концентраторами допустимый угол разориентации $\Omega_{0,9}$ в 2 раза больше, чем в системе только с первичной линзой Френеля. Незначительное уменьшение значений $\Omega_{0,9}$ в комбинированных системах с ЦС длиной 2, 5 и 8 мм объясняется погрешностью измерений этого параметра. Разориентационная характеристика всех комбинированных систем не хуже, чем характеристика системы с вторичным концентратором без ЦС, так что допустимый угол разориентации превышает 1° .

Низкое значение фактора заполнения ВАХ (FF) в комбинированной системе с ЦС длиной 2 мм и то, что FF-системы с ЦС длиной 3 мм несколько ниже, чем у систем с ЦС длиной 5, 8 и 12 мм, связано с появлением спектрального разделения в световом пятне после прохождения коротких гомогенизаторов. Из-за хроматических aberrаций первичного концентратора в центральной части светочувствительной области СЭ преимущественно оказываются длинноволновые лучи, которые проходят ЦС без отражения на его стенках. Остальные лучи, в спектральном составе которых преобладают волны из коротковолновой области спектра, отражаются на стенках ЦС и относительно более однородно распределяются по поверхности СЭ. В системах с короткими гомогенизаторами спектральная неоднородность светового пятна приводит к возникновению латеральных токов между каскадами СЭ и уменьшению фактора заполнения ВАХ.

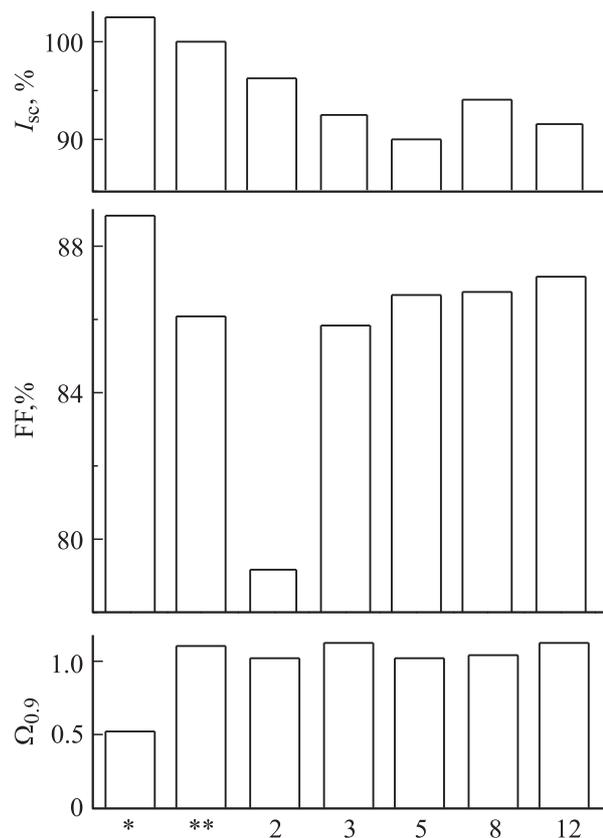


Рис. 4. Результаты измерения значений тока короткого замыкания (I_{sc}), фактора заполнения ВАХ (FF) и допустимого диапазона углов разориентации ($\Omega_{0,9}$) для фотоэлектрических модулей с трехпереходными СЭ InGaP/GaAs/Ge и оптическими концентраторами различной конфигурации: первичным концентратором в виде линзы Френеля без вторичных концентраторов (*); вторичным концентратором в виде плосковыпуклой линзы (**); вторичным концентратором в виде плосковыпуклой линзы и цилиндрическими световодами длиной 2–12 мм (обозначения 2, 3, 5, 8, 12 соответственно).

Эффективность собирания излучения различными концентрирующими системами оценивается по величине тока короткого замыкания I_{sc} . На рис. 4 за 100% принято значение I_{sc} системы со вторичным концентрированием без ЦС. Некоторое уменьшение эффективности в системах с вторичными концентраторами связано с увеличением оптических потерь за счет отражения света на возникающих при этом поверхностях дополнительных оптических элементов, чего можно избежать при нанесении просветляющих покрытий. Также в проведенных экспериментах не создавался оптический контакт между выходным основанием ЦС и поверхностью СЭ, что было вызвано необходимостью проведения сравнительных измерений с одним и тем же образцом СЭ.

Положительный эффект от введения ЦС во вторичную оптику проявляется при исследованиях распределения концентрации светового потока по поверхности СЭ. На рис. 5 показаны кривые распределения интенсивности

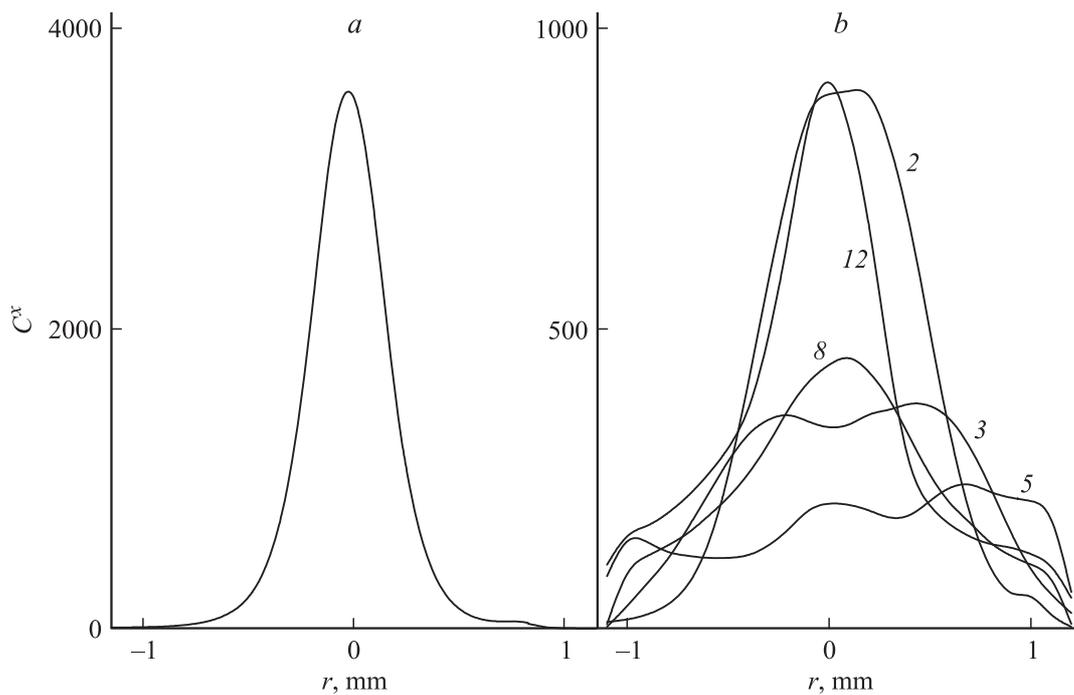


Рис. 5. Распределение излучения на поверхности СЭ, обеспечиваемое: *a* — оптической системой с вторичным концентратором без ЦС; *b* — оптической системой с вторичным концентратором, содержащим ЦС различной длины (обозначение кривых соответствует длине ЦС в миллиметрах). По осям абсцисс отмечено положение точки измерений вдоль диаметра солнечного элемента, по осям ординат — локальная кратность концентрирования C_x .

излучения, измеренные трехпереходным солнечным элементом, закрытым диафрагмой с диаметром светового отверстия 0.1 mm. Они записывались как для систем с вторичной оптикой без ЦС, так и для тех, где были ЦС разной длины. Видно, что введение ЦС определенной длины между вторичной линзой и фотоприемной поверхностью СЭ приводит к радикальному перераспределению световых потоков и значительному уменьшению максимальных значений локальной кратности концентрирования излучения в центре фокального пятна. Следует отметить, что увеличение длины ЦС от 2 до 5 mm обеспечивало понижение максимальных значений локальной концентрации излучения в фокальном пятне, однако при дальнейшем увеличении длины до 8–12 mm эта величина снова возрастала. Запись кривых распределения интенсивности излучения после прохождения коротких световодов (2–3 mm), а также сопоставление зависимостей изменения FF от расстояния D между первичной и вторичной линзами в концентрирующих системах с соответствующими ЦС позволили сделать вывод о том, что значительная часть лучей в данном случае попадает на поверхность СЭ без отражения от боковых стенок цилиндрических световодов. Увеличение максимальных значений локальной концентрации в конструкциях с „длинными“ ЦС (8–12 mm) связано с особенностями распространения излучения внутри ЦС, когда расходящийся поток имеет возможность сфокусироваться снова в центре после отражений от стенок ЦС по принципу полного внутреннего отражения.

Заключение

Таким образом, приведенные результаты исследований характеристик концентраторных систем солнечного фотоэлектрического модуля показали преимущество использования комбинированных вторичных элементов, содержащих короткофокусную плосковыпуклую линзу и цилиндрический световод оптимальной длины. В концентраторных модулях с длиной цилиндрического световода 2–12 mm разориентационная кривая остается в 2 раза шире по сравнению с вариантом, в котором отсутствует вторичная оптика. Установка цилиндрических световодов приводит к уменьшению локальной плотности излучения в фокальном пятне на поверхности солнечного элемента до уровней кратности концентрирования менее 1000^x без внесения заметных дополнительных оптических потерь. Введение после плосковыпуклой линзы цилиндрического световода длиной 3–5 mm обеспечивает сравнительно равномерное распределение излучения по поверхности солнечного элемента, в то время как в системах с более короткими или длинными ЦС образуется локальный максимум излучения в центре СЭ.

Авторы благодарят В.П. Хвостикова и Н.С. Потапович за помощь при изготовлении образцов световодов.

Работа выполнена при поддержке Комитета по науке и высшей школы Санкт-Петербурга.

Список литературы

- [1] Алфёров Ж.И., Андреев В.М., Румянцев В.Д. // ФТП. 2004. Т. 38. Вып. 8. С. 937–948.
- [2] Alferov Zh.I., Andreev V.M., Rumyantsev V.D. High-Efficient Low-Cost Photovoltaics / Eds: V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberger, Springer Series in Optical Sciences, 2008. Vol. 140. P. 101–141.
- [3] Karam Nasser H., Sherif Raed A., King Richard R. High-Efficient Low-Cost Photovoltaics / Eds: V. Petrova-Koch, R. Hezel, A. Goetzberger, Springer Series in Optical Sciences, 2008. Vol. 140. P. 199–219.
- [4] Емельянов В.М., Калюжный Н.А., Минтаиров С.А., Шварц М.З., Лантратов В.М. // ФТП. 2010. Т. 44. Вып. 12. С. 1649–1654.
- [5] Garboushian V., Stone K.W., Slade A. In the book „Concentration Photovoltaic“ / Eds: A. Luque, V. Andreev, Springer Series in Optical Sciences, 2007. Vol. 130. P. 253–277.
- [6] Rumyantsev V.D. Concentrator Photovoltaics / Eds: A. Luque, V. Andreev, Springer Series in Optical Sciences, 2007. Vol. 130. P. 151–174.
- [7] Araki K., Kondo M., Uozumi H., Yamaguchi M. // Experimental Proof and Theoretical Analysis on Effectiveness of Passive Homogenizers To 3J Concentrator Solar Cells, 3rd World Conference on Photovoltaic and Energy Conversion, Osaka, Japan, 2003. P 853–856.
- [8] Jaus J., Nitz P., Peharz G., Siefert G., Schult T., Wolf O., Passig M., Gandy T., Bett A.W. Second stage reflective and refractive optics for concentrator photovoltaics, 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference, San Diego, CA, May 11–16, 2008, Proceedings on CD.
- [9] Rumyantsev V.D., Davidyuk N.Yu., Ionova E.A., Larionov V.R., Malevskiy D.A., Pokrovskiy P.V., Sadchikov N.A., Andreev V.M. Proc. of the 5th Int. Conf. on Solar Concentrators for the Generation of Electricity, Palm Desert, California, USA, November 16–19, 2008. Proceedings on CD.
- [10] Rumyantsev V.D., Davidyuk N.Yu., Ionova E.A., Malevskiy D.A., Pokrovskiy P.V., Sadchikov N.A., Sturm M. Proc. of the CPV-6 Conference, Freiburg, April 2010.
- [11] Andreev V.M., Rumyantsev V.D., Davidyuk N.Yu., Ionova E.A., Larionov V.R., Malevskiy D.A., Monastyrenko A.O., Pokrovskiy P.V., Sadchikov N.A. Proc. of the 25th EU PVSEC, Valencia, September 2010.
- [12] Давидюк Н.Ю., Ионов Е.А., Малевский Д.А., Румянцев В.Д., Садчиков Н.А. ЖТФ. Т. 80. Вып. 7. С. 90–95.
- [13] Андреев В.М., Ларионов В.Р., Ловыгин И.В., Малевский Д.А., Масленков М.Я., Румянцев В.Д., Шварц М.З. Труды Международного Форума по нанотехнологиям. М. 2008. Т. 1. С. 205–207.